

# 嵌入式三维数字成像系统

关颖健<sup>1</sup> 彭翔<sup>1</sup> 高志<sup>2</sup> 田劲东<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060

<sup>2</sup> Department of Biomedical Engineering, Clemson University, 501-5 Rhodes Research Center, Clemson, SC 29634 USA

**摘要** 提出一种基于数字信号处理器(DSP)的嵌入式三维数字成像系统设计方案。该方案的硬件平台由条纹投影模块、数据采集模块、条纹自动分析模块及储存器等其他辅助电路组成。条纹投影模块将 DSP 输出的正弦光栅条纹,经视频编码后用 DLP 投射到物体表面;数据采集模块通过 CCD 相机采集被物体表面三维信息调制后的变形条纹图,并进行视频解码;条纹自动分析模块中利用相移算法计算折叠相位,再结合相位展开算法求绝对相位分布。系统软件采用多线程技术并行控制三个模块。在相位解调过程中以软件流水线为主综合运用了循环展开、数据预取和内联函数等多种方法优化解调程序。实验结果表明,该系统可以高速、准确地实现三维轮廓测量,优化后相位展开程序速度是优化前的7倍。

**关键词** 成像系统;三维数字成像;嵌入式系统;数字信号处理器

**中图分类号** TN863 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0244

## Embedded Three-Dimensional Imaging System

Guan Yingjian<sup>1</sup> Peng Xiang<sup>1</sup> Bruce Z. Gao<sup>2</sup> Tian Jingdong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

<sup>2</sup> Department of Biomedical Engineering, Clemson University, 501-5 Rhodes Research Center, Clemson, SC 29634 USA

**Abstract** An embedded three-dimensional (3D) imaging system based on digital signal processor (DSP) is presented. The hardware platform of this prototype is composed of fringe projection, data acquisition, automatic fringe analysis as well as other supporting circuits and memories. The fringe projection module encoded the fringe patterns that is realized by the DSP software, and projected it on object surface through the digital light projection (DLP) to create structural light illumination. The deformed fringe patterns reflected from object surface is detected by a CCD camera and then acquired by data acquisition module that decodes the video signal. The module of automatic fringe analysis is utilized to demodulate the phase distributions of deformed fringe patterns with phase shifting technique, and followed by a phase unwrapping procedure to create continuous phase maps that correlate the height variation of object surface. Three major modules are controlled by the multi-thread technique to accomplish multi-tasks in a parallel fashion. The phase demodulation algorithm, the most time-consuming calculation, is optimized by the software pipeline combined with other strategies such as loop unfolding, data prefetching and inline functions, etc. Experimental results show that the proposed approach can implement the 3D shape measurement with fast speed and good accuracy. The optimized speed of phase unwrapping program is 7 times faster than it before.

**Key words** imaging systems; three-dimensional digital imaging; embedded system; digital signal processor

## 1 引 言

近年来,光学三维数字成像技术,包括干涉测量、成像雷达、激光扫描和条纹投影等<sup>[1~4]</sup>得到越来越

广泛的应用。其中条纹投影方法由于其结构简单且具有快速、高精度、全场测量的特性而被广泛采用<sup>[5~7]</sup>。在该技术中,投影条纹受到物体表面高度

**基金项目**: 国家自然科学基金(60275012,60775021),广东省科技计划(2007B010200039)和深圳市科技计划(200619,200734)资助项目。

**作者简介**: 关颖健(1981—),男,硕士研究生,主要从事三维数字成像与造型、嵌入式系统等方面的研究。

E-mail: allengyj1999@163.com

**导师简介**: 彭翔(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事三维数字成像与造型、光学信息安全等方面的研究。

E-mail: xpeng@szu.edu.cn (通信联系人)

的调制而发生形变,条纹的空间相位也随之发生变化,从而将物体表面高度的变化信息编码在变形条纹图中。通过解调变形条纹图可以获得与空间表面高度变化对应的折叠相位分布图,再通过有效的相位复原技术来重建连续的相位分布图。应用最广泛的两类相位提取技术是相移算法<sup>[8]</sup>与傅里叶变换算法<sup>[9~11]</sup>。一般而言,对于几何形状和拓扑结构复杂的三维物体表面,传统的相位复原技术往往失效。为此,Takeda等提出的空间混频方法<sup>[12]</sup>以及Huntley等提出的时间相位展开方法<sup>[13,14]</sup>是处理上述问题的两种有效技术。为进一步扩大Huntley算法的普适性,彭翔等对时间序列相位展开算法进行了改进,提出了广义时间相位展开方法<sup>[15]</sup>。目前,基于条纹投影的三维数字成像系统结构主要由PC机来完成投影控制和数据采集与处理。然而,以

嵌入式系统<sup>[16]</sup>,以及适合大规模计算的数字信号处理器(DSP)<sup>[17]</sup>作为平台,同样能构造三维数字成像系统。

本文将嵌入式系统结构与三维数字成像机制相结合,提出一种以C64内核的DM642<sup>[18]</sup>为核心的DSP嵌入式三维数字成像系统。该嵌入式三维数字成像系统的主要特点是:1)应用多线程技术控制系统投影、采集和计算;2)通过软件流水方式优化数据计算部分,提高系统数据处理速度;3)利用现场可编程门阵列(FPGA)对相位提取进行硬件加速。

## 2 系统工作原理

投射的相移正弦条纹图经物体表面调制后,在探测器接收到的光强分布函数为

$$I_j(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y) + \delta_j], \quad (1)$$

式中 $I_j(x, y)$ 为探测到的第 $j$ 幅光强分布, $a(x, y)$ 为背景光强分布, $b(x, y)$ 为条纹的局部对比度, $f_0$ 为载波频率, $\phi(x, y)$ 为与物体表面形貌相关的相位分布。 $\delta_j$ 为相移量, $j=1, 2, \dots, N$ 。

通过相移算法可以解调出相位分布 $\phi(x, y)$ ,以五步相移为例

$$\phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{\sum_{j=1}^5 I_j \sin \delta_j}{\sum_{j=1}^5 I_j \cos \delta_j} \right], \quad \phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{(I_2 - I_5) \sin \frac{2\pi}{5} + (I_3 - I_4) \sin \frac{4\pi}{5}}{I_1 + (I_2 + I_5) \cos \frac{2\pi}{5} + (I_3 + I_4) \cos \frac{4\pi}{5}} \right], \quad (2)$$

$\phi(x, y)$ 是一个对应物体高度变化的连续分布相位图,由于反三角函数的主值范围限制,用(2)式解调出的相位分布取值在 $(-\pi/2, +\pi/2)$ 间,经扩展后在 $(-\pi, +\pi)$ 区间,存在了跳变(或者说折叠)。因此需要相位重建过程从折叠相位图恢复连续相位分布图。这里,利用先前所提出的广义时间相位展开算法<sup>[15]</sup>将折叠相位图恢复成连续相位分布图:

$$\Phi_u(x, y; t_2) = \Phi_w(x, y; t_2) - 2\pi \times \text{NINT} \left[ \frac{\Phi_w(x, y; t_2) - \Phi_u(x, y; t_1)k}{2\pi} \right], \quad k = t_2/t_1, \quad (3)$$

式中 $\text{NINT}()$ 表示四舍五入的取整运算。 $\Phi_w$ 为像素点 $(x, y)$ 的折叠相位, $\Phi_u$ 为该像素点的展开相位,测量视场内的条纹周期的初始值 $t_0=1$ 。如果投影的条纹频率按照 $t=2^k$ 变化,则(3)式变为

$$\Phi_u(x, y; 2t) = \Phi_w(x, y; 2t) - 2\pi \times \text{NINT} \left[ \frac{\Phi_w(x, y; 2t) - 2\Phi_u(x, y; t)}{2\pi} \right]. \quad (4)$$

得到展开相位图后,利用三角测量原理计算物体的三维坐标,最终给出物体的三维点云数据。

## 3 系统硬件模块

本系统选用TI公司的DM642作为核心处理器,其内部总线频率可达600 MHz,峰值运算能力为4800 MIPS,具有三个视频端口,它强大的视频功能与计算能力能够满足上述三维成像要求。

以DM642为核心建立的嵌入式三维数字成像硬件系统如图1所示,其中包括条纹投影、数据采

集、控制与条纹自动分析三个模块以及电源、存储器等辅助电路。

核心模块为控制与条纹自动分析模块。在此模块中,由DSP程序模拟产生精确的可控频率的正弦条纹,输出至条纹投影模块,经视频编码芯片SAA7105编码后,通过DLP投射到物体表面。由于DSP输出的数据格式与视频编码芯片要求的数据输入格式不同,因此FPGA作为转接控制器,负责将DSP输出数据进行重新打包发送,并且在FPGA内部集成了128个单元的颜色查找表,同时

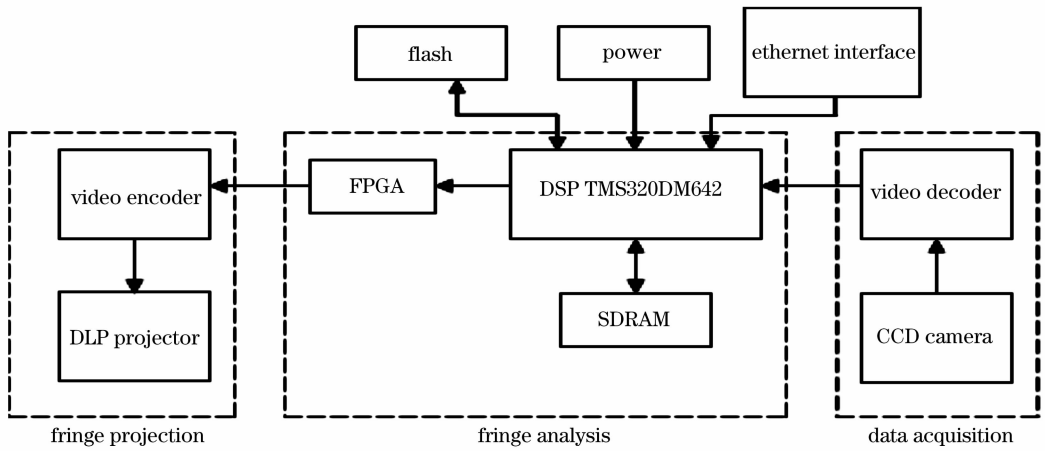


图 1 系统硬件结构

Fig.1 Schematic diagram of system hardware

可实现部分计算功能。变形条纹图由数据采集模块的 CCD 相机采集,经视频解码芯片 SAA7114 解码后,送入控制与条纹自动分析模块进行计算。

## 4 软件及程序优化

### 4.1 软件设计

由于系统功能和硬件实现需要完成条纹投影、数据采集、控制与条纹自动分析三个模块,与之相应的系统软件也分为三个部分对其加以控制。多线程技术是通用的解决多任务并行处理的手段之一,此处基于 DSP/BIOS<sup>[19]</sup> 实时操作系统及多线程技术为三个模块分别建立条纹投影、数据采集、条纹自动分析三个线程进行管理。

DSP/BIOS 操作系统能支持 4 种线程类型,分别为硬件中断(HWI),软中断(SWI),任务(TSK),后台 idle 线程(IDL)。虽然条纹自动分析线程在三个线程中占用资源最多,而且是系统的核心控制线程,但可以随时中断而不影响系统正常运行,因此将条纹自动分析线程设置为优先级较低的“任务”;而条纹投影线程与数据采集线程相互衔接而且不能被中断,因此将其设为优先级较高的“软中断”。目前,条纹投影和 CCD 扫描不能保持同步,故选择在条纹投影线程结束后触发图像采集线程。三个线程时间分配如图 2 所示。

条纹分析线程为系统核心线程,包括折叠相位计算与相位展开两部分。图 3 是根据(2)式计算折叠相位的流程图,其中  $I_j, j=1,2,3,4,5$  为五步相移图的同一像素点灰度值。LUT(Look Up Table)是反正切函数  $\arctan(x)$  的查找表,由于反正切函数是非线性函数,采用区间分段方式,对不同区间设置

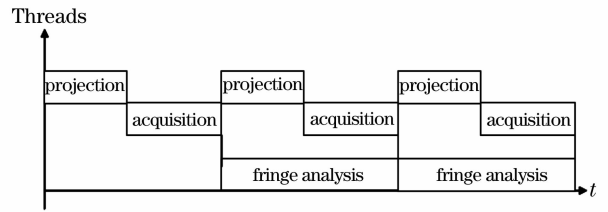


图 2 线程时间分配图

Fig.2 Threads time distribution diagram

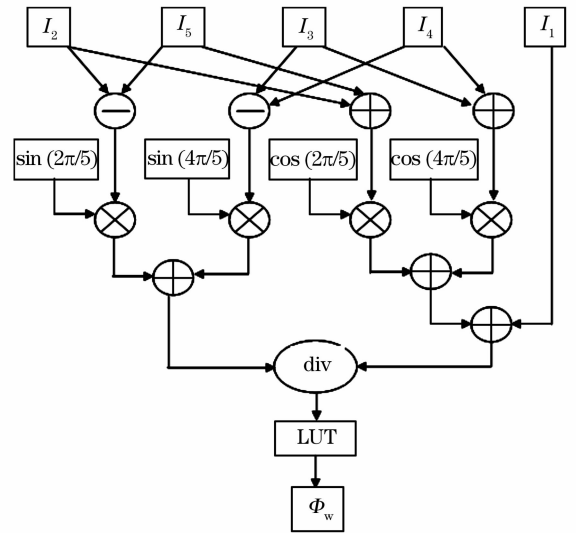


图 3 折叠相位计算流程图

Fig.3 Wrapped phase calculation flowchart

不同的采样频率。

相位展开流程如图 4 所示。其中“ $\ll$ ”为数据左移一位,INT 为取整运算, $\phi_w$  为折叠相位, $\phi_u$  为展开相位。

### 4.2 软件优化

在实验中采用软件流水、循环展开、数据预取、内联函数<sup>[20]</sup>等措施对条纹分析程序进行了性能优

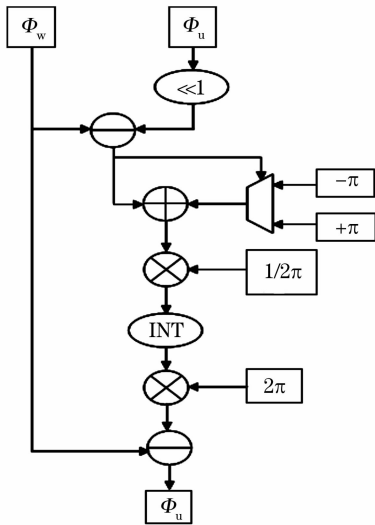


图 4 相位展开流程图

Fig. 4 Phase unwrapping calculation flowchart

化。由于数据从 SDRAM 读入至 DSP 中需要一段时间,为避免在此期间 DSP 处于空闲状态,程序利用 EDMA 技术进行数据预取,将数据读入 DSP 片内存储器,避免了 DSP 内部乘法器的等待过程;程序

调用多字节乘加内联函数对多个像素同时进行操作,不但保证了系统效率,同时保持了程序的可读性;针对 DSP 的 8 个并行计算单元,在实验中利用软件流水及循环展开技术,使 DSP 芯片 8 个并行处理单元尽可能保持满负荷运行,提高并行流水线效率。

### 4.3 硬件加速

折叠相位计算部分是系统耗时最多、计算量最大的部分,将 DSP 软件计算的方案改进为 FPGA 硬件计算的方案,使 FPGA 与 DSP 实现并行运算,比功能由此等价增加系统硬件资源。图 5 为 FPGA 硬件计算相位的结构示意图。

图 5 中的多路控制器负责协调 DSP 与 FPGA 之间的数据传送、向各流水线发送数据读入的控制信号,同时控制正弦值与余弦值寄存器向各个流水线提供对应的正、余弦数据。DSP 将 CCD 采集的变形条纹图数据,打包输入 FPGA,由多路流水线控制器将数据根据不同像素编号送入相应的流水线。为提高计算效率,将每条流水线分为两步运行,使每条流水线在同一时间可容纳两个像素数据。

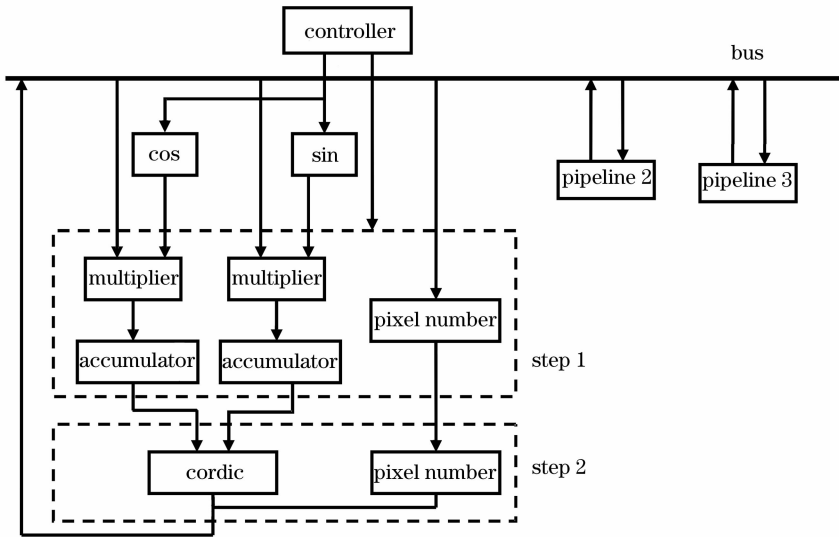


图 5 FPGA 硬件相位计算结构图

Fig. 5 Schematic diagram of wrapped phase calculation by FPGA

## 5 实验结果

实验采用五步相移七次变频,投影视场内的初始条纹周期为 1,条纹周期为 64,每次变频后视场内的条纹个数是改变前的 2 倍。条纹投影和图像采集均采用 720 pixel × 576 pixel 的 Pal 制式,相位图的分辨率为 512 pixel × 512 pixel。图 6 为系统拍摄的牙模数据。嵌入式系统平台所采用 DM642 DSP 处理器的系统时钟频率为 500 MHz,变形条纹图像处理速度可达

到 39.7 frame/s,可满足实时条纹自动分析的要求。在 2.8 G P4 处理器的 PC 机上连续相位重建共需要 3.63 s,而本系统仅需要 0.88 s,软件优化前后相位展开平均时钟数分别约为  $4.63 \times 10^8$  和  $6.44 \times 10^7$ ,速度提高了 7 倍。

## 6 结 论

提出一种嵌入式多分辨率三维数字成像流水线

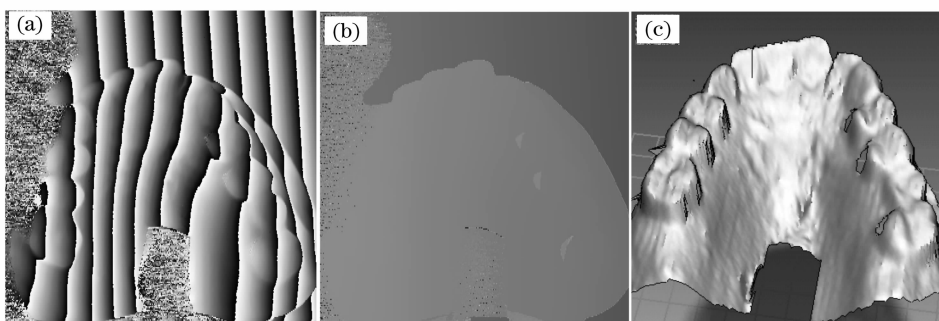


图 6 牙齿模型实际测量结果。(a) 折叠相位图;(b) 展开相位图;(c) 三维轮廓像

Fig. 6 Experiment results of tooth model. (a) wrapped phase; (b) continuous phase; (c) 3D shape result

硬件处理方法与系统。该系统使用了多线程技术,用 TMS320DM642 定点 DSP 和 FPGA 硬件实现了编码条纹投影、调制图像采集、以及条纹分析的流水线处理。同时,通过软件流水等方法对展开相位图计算过程进行优化,并利用 FPGA 对系统进行硬件加速,优化后的相位展开速度比优化前显著提高。实验证明,该系统运行速度快,运行稳定,重复性好,测量精度较高,可实现快速条纹图像处理。

### 参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1):10~22
- 2 G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella. 3D vision based on the combination of gray code and phase shift light projection [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31):6565~6573
- 3 M. Sjö Dahl, P. Synnergren. Measurement of shape by using projected random pattern and temporal digital speckle photography [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(10):1990~1997
- 4 G. Sansoni, S. Corini, S. Lazzari. Three dimensional imaging based on gray-code light projection; Characterization of the measuring algorithm and development of a measuring system for industrial application [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(23):4463~4472
- 5 R. Windecker, H. J. Tiziani. Topometry of technical and biological objects by fringe projection [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19):3644~3649
- 6 Z. Yang, Y. F. Wang. Error analysis of 3D shape construction from structured lighting [J]. *Pattern Recognition*, 1996, **29**(2):189~206
- 7 D. Caspi, N. Kiriyati, J. Shamir. Range imaging with adaptive color structured light [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1998, **20**(5):470~480
- 8 J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher *et al.*. Digital wave front measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**():2693~2703
- 9 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24):3977~3982
- 10 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. New method to eliminate extension of zero component in FTP [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):740~744
- 11 陈文静,苏显渝,曹益平等. 傅里叶变换轮廓术中抑制零频的新方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):740~744
- 12 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of dilating Gabor transform to three-dimensional shape analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6):725~729
- 13 翁嘉文,钟金钢. 伸缩窗口傅里叶变换在三维形貌测量中的应用 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(6):725~729
- 14 M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita *et al.*. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry; a single-shot three-dimensional shape measurement of object with large height discontinuities and/or surface isolations [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(22):5347~5354
- 15 J. M. Huntley, H. O. Saldner. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(17):3047~3052
- 16 H. O. Saldner, J. M. Huntley. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13):2770~2775
- 17 Peng Xiang, Wei Linbin, Qiu Wenjie *et al.*. Phase reconstruction based on generalized fringe pattern sequence encoding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1156~1161
- 18 彭翔,韦林彬,邱文杰等. 广义条纹图序列编码的相位重建 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1156~1161
- 19 C. R. Coggrave, J. M. Huntley. High-speed surface profilometer based on a spatial light modulator and pipeline image processor [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(9):1573~1581
- 20 Jiang Kejian, Zhao Hong, Song Yuanhe *et al.*. A fast 3D profilometry with high precision by using of three lines CCD [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(5):368~369
- 21 蒋克俭,赵宏,宋元鹤等. 一种快速高精度三线阵 CCD 三维轮廓术 [J]. *激光与红外*, 2005, **35**(5):368~369
- 22 Texas Instruments. TMS320DM642 Video/Imaging Fixed-Point Digital Signal Processor data manual [M]. sprs200L. Texas Instruments, <http://focus.ti.com/lit/ds/sprs200L/sprs200L.pdf>, 2002
- 23 TMS320 DSP/BIOS User's Guide[M]. spru616. Texas Instruments, <http://www.ti.com/litv/pdf/spru616.pdf>, 2002
- 24 Texas Instruments. TMS320C6000 Optimizing Compiler User's Guide [M]. spru187n. Texas Instruments, <http://www.ti.com/litv/pdf/spru187n.pdf>, 2002